Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 2, Summer. 2021, p. 185-199

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد 19، شماره 2، تابستان 1400، ص. 199-185

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی سطوح آبیاری و نیتروژن بر عملکرد، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) با استفاده از مدل‌سازی سطح- پاسخ

پرویز رضوانی مقدم[1*]، سرور خرم‌دل[2]، هدا لطیفی[3]، محمودرضا فرزانه بلگردی[4]، سید جلیل داورپناه[5]

تاریخ دریافت: 1399/10/30
تاریخ پذیرش: 1400/02/22

چکیده

بهینه‌سازی یکی از راهکارهای مؤثر مدیریتی برای بهبود کارایی مصرف منابع و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود. مدل سطح- پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی مورد استفاده برای بهینه‌سازی نهاده‌های تولید به شمار می‌آید. در این مطالعه، بهینه‌سازی سطوح نیتروژن و آبیاری کینوا با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. این آزمایش با 13 تیمار و دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی 97-1396 اجرا شد. تیمارها بر اساس سطح پایین و بالای آبیاری (به‌ترتیب با 2500 و 7500 مترمکعب در هکتار) و نیتروژن (به‌ترتیب با صفر و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار) تعیین شدند. عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص‌های کارایی نیتروژن و کارایی مصرف آب به‌عنوان متغیر وابسته مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و تغییرات این متغیرها با استفاده از مدل رگرسیونی ارزیابی شد. به منظور ارزیابی کیفیت مدل پیش‌بینی شده از آزمون عدم برازش استفاده شد. مقادیر بهینه کاربرد نیتروژن و آب برای مقادیر مطلوب متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب در سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر جزء خطی و درجه دو بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و آبیاری تنها بر کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده‌ی برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل بود. بیشترین عملکرد دانه با 3835/4 کیلوگرم در هکتار برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن و 7500 مترمکعب در هکتار آبیاری به‌دست آمد. در سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی کاربرد 90 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و 6000 مترمکعب در هکتار آبیاری موجب حصول کارایی مصرف نیتروژن با 15/93 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک، بازیافت نیتروژن 50 درصد، کارایی مصرف آب 0/5 کیلوگرم در مترمکعب و 3121 کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه شد. به‌طور کلی، به نظر می‌رسد میزان مصرف منابع به‌ویژه آب و نیتروژن بر اساس سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مطلوب در توسعه سطح زیر کشت و تولید پایدار کینوا به‌عنوان گیاهی جدید مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آزمون عدم برازش، سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی، طرح مرکب مرکزی، کارایی مصرف منابع، گیاه جدید

مقدمه

کینوا[6] (*Chenopodium quinoa* Willd.) یکی از گیاهان جدید است که از سوی سازمان خواروبار جهانی[7] به‌عنوان گیاهی استراتژیک برای امنیت غذایی دنیا معرفی شده است. کینوا گیاهی دولپه با حدود 95 درصد خود گشنی از کوه‌های آند کرانه غربی آمریکای جنوبی منشا گرفته است (Jacobsen, 1998). این گیاه یکساله با ارتفاع یک تا دو متر است که علاوه بر دانه‌ها از برگ‌های جوان آن نیز به‌عنوان سبزی تازه یا به‌صورت پخته استفاده می‌شود. گیاه کینوا تحمل مناسبی در برابر دامنه گسترده‌ای از تنش‌های غیرزنده مانند سرما، شوری و خشکی دارد که به دلیل کیفیت بالای دانه و تحمل زیاد به شرایط سخت محیطی در مناطق زیادی از جهان کشت می‌شود (Sepahvand *et al.*, 2010). دانه آن 12 تا 22 درصد پروتئین دارد و سرشار از اسیدهای آمینه ضروری مانند لایسین، متیونین و سیستئین است که در بیشتر غلات به میزان خیلی کم وجود دارد

1- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
2- دانشیار گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
3- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی، گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
4- کارشناس ارشد هواشناسی کشاورزی، معاونت خدمات بیمه‌ای بانک کشاورزی استان خراسان رضوی
5- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی، گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: rezvani@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jcesc.2021.68436.1013
6- Quinoa
7- Food and Agriculture Organization

(Matiasevich *et al.*, 2006). علاوه بر ارزش پروتئینی دانه‌های این گیاه در مقایسه با سایر غلات عدم وجود گلوتن در دانه باعث شده که از دانه کینوا جهت تولید فرآورده‌های بدون گلوتن برای افرادی که به این ماده حساسیت دارند استفاده شود و این دانه به‌عنوان یک شبه‌غله شناخته شده است (Arbab Soleimani and Ezzati, 2015). ارزش غذای بسیار بالای دانه این گیاه موجب مقایسه آن توسط سازمان خواروبار جهانی با شیر خشک شد؛ به طوری‌که محصول اصلی این گیاه دانه آن و دارای ارزش غذایی بالایی است. محصول کینوا تحت عناوین خاویار گیاهی یا برنج اینکا نیز نام‌گذاری شده است. کینوا بسیار خوش هضم بوده و منبع غنی آهن، پروتئین، منیزیم، فیبر، فسفر و ویتامین ب 2 و سرشار از ویتامین E و روغن امگا 6 می‌باشد (Lilian, 2009).

خشکی یک چالش جهانی و از جمله مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که تولید گیاهان زراعی را در دنیا تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش عملکرد محصولات زراعی می‌شود (Manivannan *et al.*, 2007; Shao *et al.*, 2006). با در نظر گرفتن نقش فعالیت‌های کشاورزی در دشت‌های کم‌آب کشور و تأثیری که کمبود آب بر آن‌ها دارد می‌توان دریافت که بهترین و پایدارترین راهکار برای تداوم و پایداری فعالیت‌های کشاورزی در آینده استفاده علمی از آب و به‌کارگیری راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف این نهاده است (Hosseinzad *et al.*, 2012). تنش خشکی موجب تحت تاثیر قرار گرفتن خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان می‌شود (Heidari *et al.*, 2014). نتایج تحقیقی درخصوص اثر کم‌آبیاری بر روی گیاه کینوا در کشور برزیل نشان داد که کم‌آبیاری به میزان 50 درصد منجر به کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک ساقه، برگ، سنبله و وزن هزار دانه شد (Jayme-Oliveira *et al.*, 2017). جمالی (Jamali, 2016) در تحقیقی بر روی گیاه کینوا رقم تی‌تی‌کا نشان داد که کم‌آبیاری منجر به کاهش وزن هزار دانه، ارتفاع بوته، وزن خشک اندام‌های هوایی، ریشه و عملکرد دانه در بوته شد. همچنین با توجه به شرایط محدودیت آب در منطقه و با توجه به عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای 100 درصد و 75 درصد نیاز آبی گیاه در صفت عملکرد دانه، نتیجه گرفته شد که این گیاه را با این میزان آب در منطقه گرگان تولید نمود. نتایج مطالعات رزاقی و همکاران (Razzaghi *et al.*, 2020) بر روی گیاه کینوا در ایران نشان داد که تاثیر کم‌آبیاری بر صفاتی همچون عملکرد دانه، بهره‌وری آب به میزان آب آبیاری و مرحله رشدی که کم‌آبیاری در آن اعمال می‌شود بستگی دارد. یکی از حساس‌ترین مراحل رشدی به کم‌آبی، گلدهی است که در صورت تنش آبی در این مرحله، عملکرد دانه کاهش یافته که این کاهش با انجام آبیاری در مرحله پر شدن دانه نیز جبران نمی‌گردد. این محققان اعلام نمودند که کمترین میزان عملکرد دانه در تیمارهای کم‌آبیاری در کلیه مراحل رشد و مراحل رشد رویشی + گلدهی حاصل شد.

مصرف متعادل نیتروژن برای کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست ضروری است (Khajavi-Shojaei *et al.*, 2019). کینوا به محتوی نیتروژن خاک بسیار حساس بوده و کود نیتروژن برای رشد این محصول در طول دوره رشد رویشی مهم است (Erley *et al.*, 2005). بسرا و همکاران (Basra *et al.*, 2014) مصرف 75 کیلوگرم نیتروژن در هکتار بهترین مقدار کود نیتروژن برای رشد و نمو به کینوا و دستیابی به حداکثر عملکرد اقتصادی در شرایط زیست‌محیطی پاکستان را گزارش نمودند. همچنین ارلی و همکاران (Erley *et al.*, 2005) گزارش دادند که کینوا به شدت به کود نیتروژن پاسخ نشان می‌دهد و کاربرد 120 کیلوگرم نیتروژن بر هکتار در خاک لومی عملکرد بیشتر از 350 کیلوگرم در هکتار را نشان داده و عملکرد دانه نسبت به شاهد 94 درصد افزایش داشته است، همچنین با افزایش کاربرد سطح کود نیتروژن از 80 به 120 کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌طور متوسط به 12 درصد افزایش در عملکرد کینوا دست یافته‌اند.

بهبود کارآیی سامانه‌ها و افزایش کارآیی فرآیندها بدون افزایش هزینه دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. روش مورد استفاده بدین منظور، بهینه‌سازی[1] نامیده می‌شود. روش سطح- پاسخ (RSM)[2] که برای نخستین بار توسط باکس و ویلسون (Box and Wilson, 1951) معرفی شد، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که در مورد فرآیندهایی کاربرد دارد که چندمتغیره هستند و یا میان متغیرها برهمکنش وجود داشته و پاسخ غیرخطی است (Dean and Voss, 2002; Myers and Montgomery, 2002). به‌منظور دستیابی به عملکرد قابل قبول و کاهش هم‌زمان آلودگی‌های زیست‌محیطی، نهاده‌های مورد استفاده در مزرعه باید با توجه به عملکرد مورد انتظار به‌صورت بهینه مصرف شوند. یکی از روش‌های آماری برای حصول مقادیر بهینه نهاده‌ها، استفاده از روش سطح- پاسخ می‌باشد (Aslan, 2007; Kwak, 2005).

روش سطح- پاسخ به منظور تعیین ترکیبی از تیمارها، یک مدل آماری با بهترین برازش بر اساس داده‌های مشاهده شده از نتایج طرح آزمایشی را ایجاد و مقادیر بهینه متغیرهای مستقل برای حصول مقدار مورد انتظار برای متغیر وابسته را تعیین می‌کند (Montgomery, 2001; Kalavathy *et al.*, 2009). از جمله مزایای دیگر استفاده از روش سطح- پاسخ می‌توان به بررسی اثرات متقابل مؤثر بر متغیر وابسته و همچنین ترکیب تیمارهای مختلف به‌صورت هم‌زمان با تعداد آزمایش‌های محدود اشاره کرد (Kalavathy *et al.*, 2009). طرح

1- Optimization
2- Response-Surface Methodology

مرکب مرکزی (CCD)[1] یکی از انواع طرح‌های آماری برای مدل‌سازی سطح- پاسخ می‌باشد که این طرح به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آزمایش‌های فاکتوریل محسوب می‌شود و امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیرهای مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007; Obeng *et al.*, 2005). این روش توسط باکس و ویلسون (Box and Wilson, 1951) مطرح و توسط باکس و هانتر (Box and Hunter, 1957) تکمیل شد. طرح مرکب مرکزی به‌عنوان طرحی به‌منظور تعیین مقادیر متغیرهای مستقل برای توصیف تغییرات متغیر وابسته تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح فاکتورها به‌عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Clarke and Kempson, 1997; Kalavathy *et al.*, 2009).

کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2013) طی آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی به منظور تعیین بهینه میزان مصرف آب (1500 و 4000 مترمکعب)، کود نیتروژن (صفر و 400 کیلوگرم کود اوره در هکتار) و تراکم (50 و 150 بوته در متر مربع) در کشت کلزا[2] گزارش نمودند که افزایش سطوح آبیاری و کود باعث افزایش عملکرد دانه و تشدید تلفات نیتروژن شد، در صورتی‌که افزایش تراکم باعث افزایش عملکرد شد و به دلیل افزایش جذب نیتروژن کاهش تلفات عملکرد را به دنبال داشت. به‌طور کلی، این محققان اظهار داشتند که مصرف منابع بر اساس سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی به دلیل توجه توأم به مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی نسبت به دو سناریوی دیگر ارجحیت دارد. کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2019) طی مطالعه‌ای دیگر با برآورد مقادیر بهینه کود نیتروژن (صفر و 400 کیلوگرم کود اوره در هکتار) و آبیاری (2500 و 5000 مترمکعب) در زراعت گندم[3] در قالب طرح مرکب مرکزی اظهار داشتند که افزایش مصرف کود نیتروژن و آبیاری اثر مثبتی بر افزایش عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب داشت؛ لکن افزایش آبیاری منجر به کاهش کارایی مصرف نیتروژن و افزایش تلفات نیتروژن شد. لطیفی و همکاران (Latifi *et al.*, 2018) طی آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی به منظور تعیین بهینه کود نیتروژن (صفر و 100 کیلوگرم کود اوره در هکتار) و تراکم (10 و 40 بوته در متر مربع) در کشت کنجد[4] گزارش نمودند که افزایش کوددهی باعث افزایش عملکرد دانه و کاهش کارایی جذب و کارایی مصرف نیتروژن شد همچنین اظهار نمودند که کاهش مصرف کود نیتروژن بعلت کاهش تلفات نیتروژن از آلودگی‌های زیست‌محیطی خواهد کاست. با توجه به آنچه گفته شد، هدف از اجرای این تحقیق تعیین میزان بهینه کود نیتروژن، آبیاری بهینه کینوا و اثر متقابل این عوامل جهت حصول بالاترین میزان عملکرد دانه و بهبود شاخص‌های کارایی نیتروژن و آب با استفاده از طرح مرکب مرکزی در شرایط آب و هوایی مشهد بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی 97-1396 در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در 10 کیلومتری شرق مشهد با طول جغرافیایی 59 درجه و 28 دقیقه و عرض جغرافیایی 36 درجه و 15 دقیقه و ارتفاع 985 متری از سطح دریا اجرا شد. تعداد تیمارهای طراحی شده در طرح مرکب مرکزی با استفاده از رابطه (1) محاسبه شد.

$$t = 2^k + 2k + r \qquad (1)$$

در این فرمول، k: نشان‌دهنده تعداد فاکتور و r: تعداد تکرار تیمار در سطح میانگین می‌باشد (Box and Hunter, 1957; Aslan, 2007). بر این اساس، ترکیب تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین آب (2500 و 7500 متر مکعب) و سطوح بالا و پایین نیتروژن (0 و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار) برای کینوا توسط نرم‌افزار Minitab ver.17 تعیین شد. بر این اساس، 13 ترکیب تیماری (جدول 1) با دو تکرار برای این آزمایش در نظر گرفته شد.

در مرحله آماده‌سازی زمین و پیش از کاشت، نمونه‌ای مرکب از عمق 30-0 سانتی‌متری خاک به صورت تصادفی تهیه و جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج آزمون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول 2 ارائه شده است.

بذر مورد استفاده (بذر تی‌تی‌کا) جهت کاشت قبل از شروع آزمایش از شرکت کشت و صنعت انابد واقع در شهرستان بردسکن تهیه شد. پس از آماده‌سازی زمین، عملیات کاشت دستی در اول مرداد ماه 1397 در عمق 3-2 سانتی‌متری انجام شد. کود نیتروژن مصرفی (به‌صورت کود اوره با 46 درصد نیتروژن) برای هر کرت و بر اساس جدول 1 به سه قسمت مساوی تقسیم شد که یک سوم آن در زمان کاشت اعمال شد. بخش دوم کود نیتروژن یک ماه پس از کاشت (در مرحله استقرار) و بخش سوم، دو ماه پس از کاشت (در مرحله گلدهی) توزیع شد.

اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی تا پایان رشد محصول، به شیوه نشتی و با استفاده از سیفون بر اساس تیمار مربوطه انجام شد. به‌منظور جلوگیری از اختلاط اثر تیمارهای کودی، انتهای کرت‌ها مسدود و به منظور اعمال تیمارهای آبیاری، میزان آبیاری موردنیاز در هر دور آبیاری محاسبه شد و جهت آبیاری یکنواخت در هر گروه از تیمارها از پمپ و کنتور آب استفاده شد. وجین علف های هرز از هفته سوم و به‌صورت مستمر و تا بسته شدن کانوپی گیاهان، به‌صورت دستی انجام شد. پس از حذف حاشیه های

1- Central Composite Design

2- *Brassica napus*

3- *Triticum aestivum*

4- *Sesamum indicum*

نیم‌متری کرت‌ها، به‌عنوان اثر حاشیه برداشت از یک متر مربع هر کرت در اوایل آبان‌ماه انجام شد. در هنگام برداشت، در سطح مذکور کلیه بوته‌ها از محل طوقه توسط داس جدا شد. پس از خشک شدن بوته‌ها دانه با استفاده از الک از کاه و کلش، کاملاً جدا و تمیز شد. دانه‌های برداشت شده از هر کرت آزمایشی به‌طور جداگانه با ترازوی دقیق توزین و به این ترتیب، عملکرد دانه و بیولوژیک بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. میزان نیتروژن خاک در انتهای فصل رشد از عمق 30-0 سانتی‌متری خاک هر کرت اندازه‌گیری شد.

جدول 1- ضرایب و مقادیر تیمارها بر اساس طرح مرکب مرکزی

Table 1- Amounts and coefficients for treatments based on central composite design

مقادیر تیمارها Treatments		ضرایب Coefficients		Runs
نیتروژن Nitrogen rate ($kg.ha^{-1}$)	آب Water rate ($m^3.ha^{-1}$)	X_2	X_1	
0	2500	-1	-1	1
200	2500	+1	-1	2
0	7500	-1	+1	3
200	7500	+1	+1	4
0	5000	-1	0	5
200	5000	+1	0	6
100	2500	0	-1	7
100	7500	0	+1	8
100	5000	0	0	9
100	5000	0	0	10
100	5000	0	0	11
100	5000	0	0	12
100	5000	0	0	13

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل سطوح نیتروژن و آب هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables of nitrogen and water levels, respectively.

جدول2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Physical and chemical properties of soil

بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم K ($mg.kg^{-1}$)
لوم سیلتی Silty loam	7.92	0.58	0.62	0.058	29.2	186

درصد بازیافت نیتروژن[1](NUpE) بر اساس نسبت بین عملکرد نیتروژن در گیاه (کیلوگرم نیتروژن جذب شده در هکتار) بر کل مقدار نیتروژن در خاک (کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد (رابطه 2) (Hatermink *et al.*, 2000).

$$NUpE = \frac{Plant\ N\ content}{N_{fertilizer} + N_{initial}} \quad (2)$$

که در این معادله، plant N content: نیتروژن اندام‌های هوایی (کیلوگرم نیتروژن جذب شده در هکتار)، Nfertilizer+Ninitial: نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد (کیلوگرم نیتروژن در هکتار)+ نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) می‌باشد.

جهت محاسبه کارایی مصرف نیتروژن (NUE)[2] از رابطه (3) استفاده شد (Hatermink *et al.*, 2000).

$$NUE = \frac{Y_S}{N_{fertilizer} + N_{initial}} \quad (3)$$

که در این معادله، Ys: عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)، Nfertilizer+Ninitial: نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) + نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) می‌باشد.

جهت محاسبه کارایی مصرف آب (WUE[3]) از رابطه (4) استفاده شد (Rodrigues and Pereira, 2009).

$$WUE = \frac{Y_s}{Irrigation} \quad (4)$$

1- Nitrogen recovery

2- Nitrogen use efficiency

3- Water use efficiency

در این معادله، Irrigation: میزان آب مورد نیاز برای گیاه در طول دوره رشد است.

به‌منظور انتخاب مدل مناسب، مدل درجه دو کامل[1] با اثرات متقابل بین فاکتورها برازش داده شد (رابطه 5). سپس بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مقادیر F، P و R^2) و آزمون عدم برازش[2] بهترین مدل انتخاب و از این مدل برای بهینه‌سازی استفاده شد (Koocheki *et al.*, 2019; Koocheki *et al.*, 2013).

$$Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2 \qquad (5)$$

در این معادله، Y: متغیر وابسته (که پاسخ به عملکرد دانه، بیولوژیک و سایر صفات تحت بررسی بودند)، x_1: متغیر مستقل کود نیتروژن، x_2: متغیر مستقل آبیاری و a_1 تا a_5: ضرایب معادله می‌باشند.

در نهایت، نتایج پیش‌بینی با داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا[3] انجام شد (رابطه 6).

$$\text{RMSE (\%)} = \frac{100}{\bar{O}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \qquad (6)$$

که در این معادله، $\bar{O}$: میانگین مشاهدات، P_i: مقادیر پیش‌بینی شده و O_i: مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

RMSE به‌صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و بر اساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی‌که RMSE کمتر از 10 درصد باشد، عالی، بین 10 تا 20 درصد، خوب، بین 20 تا 30 درصد، متوسط و بالاتر از 30 درصد، ضعیف برآورد می‌شود (Koocheki *et al.*, 2019).

مقدار بهینه آبیاری و کود نیتروژن بر اساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی محاسبه شد. بدین‌منظور، در سناریوی اقتصادی، عملکرد دانه، در سناریوی زیست‌محیطی، کارایی مصرف نیتروژن و آب و در سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی عملکرد دانه، کارایی مصرف نیتروژن و آب به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده مقدار بهینه آبیاری و کود نیتروژن مورد استفاده قرار گرفتند.

جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار Minitab ver.17 و MS Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل برای هر کدام از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، کارایی بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب تحت تأثیر میزان آبیاری و نیتروژن در جدول 3 ارائه شده است.

نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار ($p\leq0/01$) بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد ($p\leq0/01$). اثر متقابل دو عامل نیتروژن و آب تنها بر کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن معنی‌دار ($p\leq0/01$) بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده‌ی برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل می‌باشد. مقدار پایین RMSE نشان‌دهنده برازش عالی مدل در تمام صفات به‌جز کارایی مصرف نیتروژن می‌باشد و بر اساس مقدار RMSE، برازش مدل برای این صفت، متوسط است (جدول 3).

ضرایب رگرسیون برای مدل‌های برازش شده در مورد هر یک از صفات مورد مطالعه آزمایش در جدول 4 ذکر شده‌است.

ضرایب تبیین (R^2) نشان‌دهنده‌ی درصد تغییرات هر کدام از متغیرهای وابسته به‌وسیله متغیر مستقل بوده و ضرایب تبیین بالا در این معادلات نشان‌دهنده‌ی برازش خوب مدل محاسباتی است (جدول 4). بر این اساس مدل درجه دو کامل 83/4-55/19 درصد از تغییرات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک و 94/5- 85/29 درصد از تغییرات شاخص‌های بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب را نشان می‌دهد (جدول 4).

مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، کارایی بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب کینوا در جدول 5 نشان داده شده است.

عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک: نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 3835/4 و 3860/6 کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار+ 7500 مترمکعب آبیاری و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار+ 5000 مترمکعب آبیاری به‌دست آمد و کمترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 2009/5 و 2051/75 کیلوگرم در هکتار برای عدم مصرف نیتروژن+ 2500 مترمکعب آبیاری به‌دست آمد. همچنین بیشترین عملکرد بیولوژیک مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 9425 و 9013 کیلوگرم در هکتار برای کاربرد 200 کیلوگرم نیتروژن+ 5000 مترمکعب در هکتار آبیاری به‌دست آمد (جدول 5).

نتایج سطح- پاسخ اثر سطوح آبیاری و نیتروژن بر عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن و آبیاری، شاخص‌های عملکرد کینوا افزایش یافت که البته در خصوص استفاده از نیتروژن، با افزایش میزان نیتروژن بیش از 100 کیلوگرم در هکتار عملکرد با شیب بیشتری افزایش یافت (شکل 1).

1- Full quadratic regression

2- Lack of-fit

3- RMSE: Root mean square error

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مدل رگرسیونی درجه دو کامل

Table 3- Variance analysis (mean of squares) of the full quadratic regression model

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	کارایی مصرف آب Water use efficiency	کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency	کارایی بازیافت نیتروژن Nitrogen uptake efficiency
مدل: Model:	6	1055000^{**}	5829235^{**}	0.188852^{**}	102.664^{**}	1349.15^{**}
تکرار Replication	1	158559^{ns}	4^{ns}	0.009438^{ns}	1.541^{ns}	0^{ns}
خطی Linear	2	2386323^{**}	11690521^{**}	0.502912^{**}	246.816^{**}	3060.57^{**}
آب Water	1	2384852^{**}	13020833^{**}	0.852750^{**}	72.237^{**}	535.13^{**}
نیتروژن Nitrogen	1	2387795^{**}	10360208^{**}	0.153074^{**}	421.395^{**}	5586.00^{**}
درجه 2 Square	2	699396^{**}	5341558^{**}	0.038657^{**}	55.638^{**}	882.07^{**}
آب× آب Water × Water	1	1017817^{**}	5897545^{**}	0.001085^{ns}	34.815^{**}	395.99^{**}
نیتروژن× نیتروژن Nitrogen× Nitrogen	1	1217266^{**}	8689384^{**}	0.058917^{**}	106.763^{**}	1745.59^{**}
اثر متقابل Interaction	1	0^{ns}	911250^{ns}	0.040538^{**}	9.533^{**}	209.63^{ns}
آب × نیتروژن Water ×Nitrogen	1	0^{ns}	911250^{ns}	0.040538^{**}	9.533^{**}	209.63^{ns}
خطا Error	19	48098	950801	0.002602	1.567	53.63
عدم برازش Lack of-fit	11	60084^{ns}	1183777^{ns}	0.003574^{ns}	2.192^{ns}	24.48^{ns}
خطای خالص Pure error	8	31616	630460	0.001265	0.708	74.83
RMSE (%)	–	1.15	1.95	5.51	24.01	6.88
کل Total	25	–	–	–	–	–

ns، * و**: به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد

ns, * and **: represent non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول 4- ضرایب رگرسیون و تبیین برای مدل درجه دو کامل: $Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

Table 4- Regression coefficients and R^2 for full quadratic model: $Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2 (%)
عملکرد دانه Seed yield	198	2.47	0.929	0.03464	-0.000075	0.000001	83.4
عملکرد بیولوژیک Biological yield	326	- 9.5	2.187	0.1260	- 0.000164	- 0.00130	55.19
بازیافت نیتروژن Nitrogen uptake efficiency	27.7	-0.4689	0.01827	0.001778	- 0.000001	- 0.000020	85.29
کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency	7.78	- 0.1254	0.005435	0.000440	- 0.000000	0.000004	93.93
کارایی مصرف آب Water use efficiency	1.0409	0.000488	- 0.000101	0.000010	0.000000	- 0.000000	94.5

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی متغیرهای مستقل سطوح نیتروژن و آب هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables such as nitrogen and water levels, respectively.

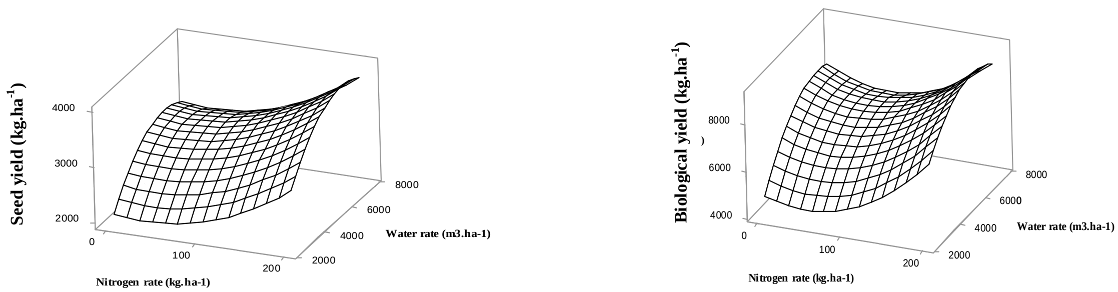
جدول ۵- مقادیر مشاهده شده و برازش شده برای عملکرد و شاخص‌های کارایی نیتروژن و کارایی مصرف آب کینوا تحت تأثیر سطوح نیتروژن و آب

Table 5- Observed and predicted values for yield and nitrogen efficiency indices and water use efficiency of quinoa affected as nitrogen and water levels

میزان نیتروژن Nitrogen rate ($kg.ha^{-1}$)	میزان آب Water rate ($m^3.ha^{-1}$)	عملکرد دانه Seed yield ($kg.ha^{-1}$)		عملکرد بیولوژیک Biological yield ($kg.ha^{-1}$)		بازیافت نیتروژن Nitrogen uptake efficiency (percent)		کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency (kg N seed/kg N soil)		کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg seed.m^{-3} water)	
		مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برازش شده Predicted
0	2500	2009.50	2051.75	4500.00	4728.25	60.90	67.13	18.05	21.37	0.80	0.79
200	2500	3077.55	2943.85	7050.00	7269.25	32.29	34.47	9.88	11.89	1.23	1.29
0	7500	2766.80	2946.75	7250.00	7503.25	85.98	108.48	24.85	48.54	0.37	0.28
200	7500	3835.40	3839.85	8450.00	8694.25	36.90	55.82	12.32	35.06	0.51	0.78
0	5000	3187.50	2968.00	7600.00	7147.00	91.71	94.05	26.84	34.96	0.64	0.54
200	5000	3727.30	3860.60	9425.00	9013.00	39.95	51.39	11.97	23.48	0.75	1.03
100	2500	2061.70	2151.40	5175.00	4744.75	34.40	33.02	9.75	12.23	0.82	0.94
100	7500	3221.35	3046.90	7275.00	6844.75	44.78	64.37	15.24	37.40	0.38	0.43
100	5000	3214.85	3067.90	7325.00	6826.00	50.77	54.94	15.21	24.82	0.64	0.68
100	5000	3021.75	3067.90	5650.00	6826.00	39.14	54.94	14.30	24.82	0.60	0.68
100	5000	3012.60	3067.90	6900.00	6826.00	45.43	54.94	14.25	24.82	0.60	0.68
100	5000	2930.45	3067.90	6205.00	6826.00	42.47	54.94	13.86	24.82	0.59	0.68
100	5000	3068.75	3067.90	7100.00	6826.00	46.83	54.94	14.52	24.82	0.61	0.68

X_1 و X_2: به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی متغیرهای مستقل سطوح نیتروژن و آب هستند.

X_1 and X_2: indicate independent variables such as nitrogen and water levels, respectively



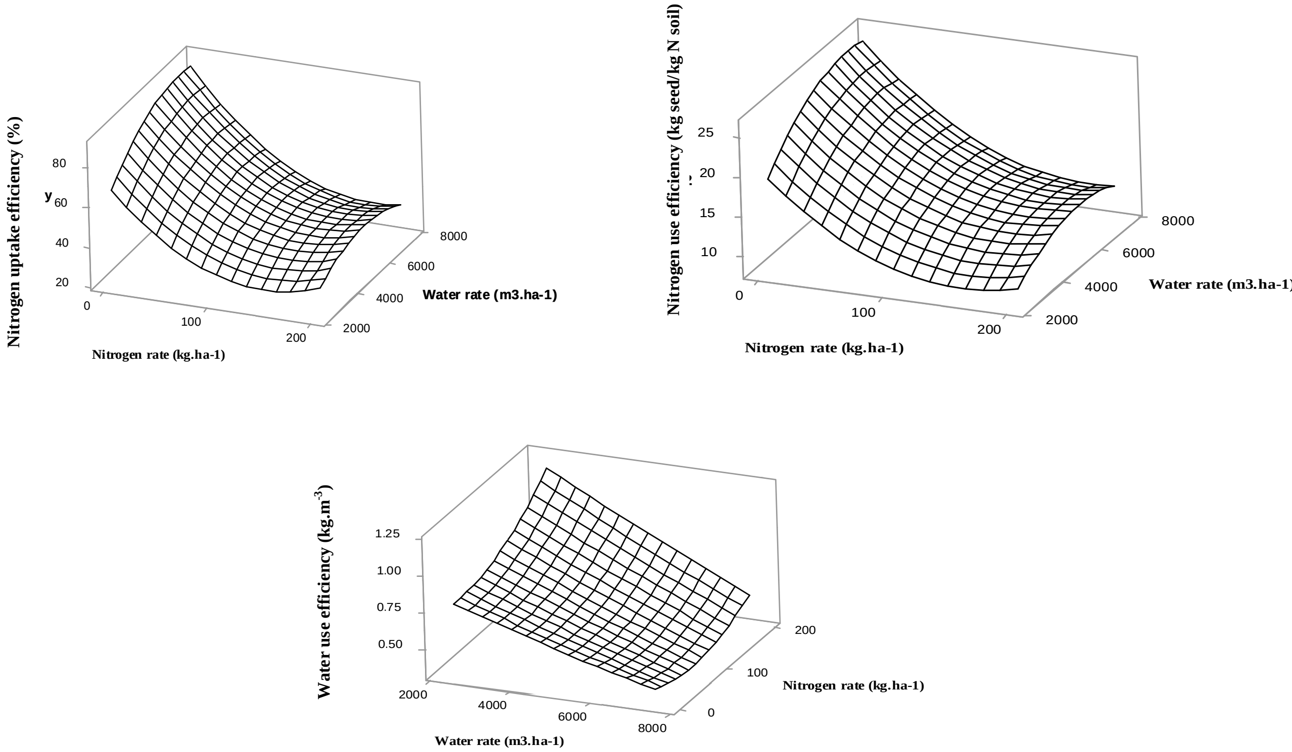
شکل 1- مدل سطح- پاسخ عملکرد دانه (الف) و عملکرد بیولوژیک (ب) کینوا تحت تأثیر سطوح نیتروژن و آبیاری

Figure 1- Response surface model for seed (A) and biological yield (B) of quinoa affected of nitrogen and water levels

همچنین نتایج نشان داد که میزان نیتروژن و آب، عملکرد دانه و بیولوژیک را بـه‌طـور معنـی‌داری تحـت تـأثیر قـرار داد (جـدول 3). همانطوری‌که انتظار می‌رود با افزایش سطوح تیمارها (نیتروژن و آب) عملکرد به‌واسطه تحریک رشد رویشی افزایش یافت. در همین راسـتا ارلی و همکاران (Erley *et al.*, 2005) گزارش دادند کـه کینـوا بـه شدت نسبت به مصرف کود نیتروژن واکنش نشان می‌دهـد. برتـی و همکاران (Berti *et al.*, 2000) گزارش دادند که بیشـترین عملکـرد دانه کینوا گیاهی است که برای بالاترین میزان مصرف نیتروژن (225 کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. گوما (Goma, 2013) گـزارش کـرد که کود نیتروژن باعث افزایش رشد رویشی و روند سوخت و سـاز در کینوا و همچنین افزایش تجمع ماده خشـک گیـاه مـی‌شـود. نتـایج آزمایش در دانشگاه ازمیر ترکیه در خصوص اثر سطوح کود نیتـروژن (صفر، 50، 75، 100، 125، 150، 175 و 200 کیلوگرم در هکتار) بـر عملکرد دانه کینوا در شرایط آب و هوایی مدیترانـه‌ای نشـان داد کـه بهترین میزان نیتروژن برای تولید بیشترین عملکرد دانه (2/95 تن در هکتار) در شرایط استفاده از 150 کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دسـت آمد (Geren, 2015). نتایج آزمایشی در پاکسـتان بـر روی دو رقـم کینوا نشان داد که بیشترین عملکرد تحت تـأثیر مصـرف 75 و 100 کیلـوگرم در هکتـار بـه‌دسـت آمـد (Basra *et al.*, 2014). شـمس (Shams, 2012) طی بررسی روی واکنش کینوا به سـطوح مختلـف کود نیتروژن (0، 90، 180، 270 و 360 کیلوگرم در هکتار) دریافـت که با افزایش سطوح نیتروژن تا بالاترین سطح، عملکـرد بیولـوژیکی افزایش یافت و افزایش مقادیر نیتروژن نه تنها منجر به افزایش رشد محصول و تولید زیست‌توده کل شد، بلکه کیفیت دانـه را نیـز تحـت تاثیر قرار داد. نتایج آزمایشی در مصر روی بررسی واکنش کینـوا بـه سطوح مختلف آبیاری (100، 60 و 30 درصد ظرفیت زراعـی) نشـان داد که تنش آبی (30 درصد ظرفیت زراعی)، 74 درصد عملکرد دانه را نسبت به تیمار آبیاری کامل کاهش مـی‌دهـد (Telahigue *et al.*, 2017)، همچنین نتایج آزمایشی شامل اثر تیمارهای آبیـاری (تـنش خشکی به میزان 50 و آبیاری کامل) بر رشد و عملکرد کینوا نشان داد که اثر تنش خشکی در مراحل مختلـف رشـد بـر عملکـرد و اجـزای عملکرد (شامل ارتفاع، عملکـرد دانـه، عملکـرد بیولوژیـک، شـاخص برداشت و وزن هزار دانه) معنی‌دار شد. بیشترین میزان عملکـرد دانـه (4/334 تن در هکتار) مربوط به رقم تی‌تی‌کا با آبیاری کامل وکمترین میزان عملکرد (760 کیلوگرم در هکتار) مربوط به رقم گیزوان تحـت تنش 50 درصد نیاز آبی مشاهده شد که علت این امر مربـوط بـه آن است که گیاه در زمان پر شدن دانه وقتی بـا تـنش خشـکی روبـه‌رو می‌شود، از طریق افت فتوسنتز، باعث کاهش عملکرد دانـه در واحـد سطح می‌شود. حال اگر خشکی در مرحله پر شدن دانه مخصوصاً اگر تحت شرایط افزایش دما همراه باشد، موجب تسریع در پیری برگ‌ها، کاهش طول دوره پر شدن دانه، کاهش میـانگین وزن دانـه‌هـا و در نتیجه افت عملکرد می‌شود که این موارد بـه دلیـل برگریـزی شـدید ناشی از تنش خشکی می‌باشد (Kazemi *et al.*, 2019).

بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن: نتایج نشـان داد بیشترین کارایی بازیافت نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شـده به‌ترتیـب بـا 108/48 و 91/71 درصـد تحـت تـأثیر مصـرف 7500 مترمکعب آب+ عدم مصرف نیتـروژن و 5000 مترمکعـب آب+ عـدم مصرف نیتروژن به‌دست آمـد و کمتـرین کـارایی بازیافـت نیتـروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیـب بـا 33/02 و 32/29 درصـد برای مصرف 2500 مترمکعب آب+ 100 کیلوگرم در هکتـار و 2500 مترمکعب آب+ 200 کیلوگرم در هکتار حاصل شد. همچنین بیشترین کارایی مصرف نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده بـه‌ترتیـب بـا 48/54 و 26/84 کیلوگرم نیتروژن دانه به کیلـوگرم نیتـروژن خـاک برای مصرف 7500 مترمکعب آب+ عـدم مصـرف نیتـروژن و 5000 مترمکعب آب+ عدم مصرف نیتروژن به‌دست آمد و کمتـرین کـارایی مصرف نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیب بـا 11/98 و 9/75 کیلوگرم نیتروژن دانه به کیلوگرم نیتروژن خاک برای مصـرف

100 کیلوگرم نیتروژن+ 2500 مترمکعب در هکتار آب و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار+ 2500 مترمکعب در هکتار آب حاصل شد (جدول 5). نتایج سطح- پاسخ اثر آبیاری و نیتروژن بر شاخص‌های مقادیر بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن، شاخص‌های بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن کاهش و با افزایش آبیاری مقادیر این صفات افزایش یافت (شکل 1).



شکل 2- مدل سطح- پاسخ بازیافت نیتروژن (الف)، کارایی مصرف نیتروژن (ب) و کارایی مصرف آب (ج) کینوا تحت تأثیر سطوح نیتروژن و آبیاری

Figure 2- Response- surface model for nitrogen uptake efficiency (A) , nitrogen use efficiency (B) and water use efficiency (C) of quinoa affected of nitrogen and water levels

کاهش شاخص‌های بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن با افزایش مصرف نیتروژن دور از انتظار نیست؛ همین‌طور که در سایر مطالعات نیز اشاره شده و نتایج مشابه این مطالعه روی کاهش شاخص‌های کارایی مصرف منابع تحت تاثیر افزایش آن حاصل و تایید شده است. در همین راستا، کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2018) گزارش کردند که در گیاه ذرت[1] با افزایش مصرف نیتروژن، شاخص بازیافت آن کاهش یافت و دلیل این امر به افزایش فراهمی نیتروژن نسبت داده شد. همچنین آبشویی، باعث افزایش تلفات و کاهش کارایی جذب و مصرف نیتروژن می‌گردد. به عقیده مونتمورو و همکاران (Montemuro *et al.*, 2006) دو عامل اساسی در افزایش کارایی مصرف نیتروژن شامل جذب نیتروژن از خاک تا قبل از گلدهی گیاه و همچنین جذب این عنصر متحرک در طی مراحل انتهایی رشد می‌باشند. همچنین ممکن است با افزایش مصرف کود، گیاه نتواند متناسب با این افزایش، از رشد زایشی مطلوبی برخوردار باشد. در خصوص افزایش شاخص‌های کارایی نیتروژن با افزایش آبیاری به‌نظر می‌رسد، میزان حلالیت نیتروژن تحت تاثیر آبشویی در نتیجه افزایش آبیاری افزایش یافته که بر روی جذب و مصرف آن تاثیر مثبتی دارد. نتایج آزمایشی در اهواز در خصوص اثر سطوح کود نیتروژن (صفر، 80، 160، 240، 320 کیلوگرم در هکتار) بر شاخص‌های کارایی نیتروژن در کینوا نشان داد که با مصرف نیتروژن، میزان این شاخص‌ها کاهش یافت،

1- *Zea mays*

به‌طوری‌که بیشترین کارایی زراعی نیتروژن و کـارایی فیزیولوژیـک نیتروژن به‌ترتیب با 38/71 و 113/4 کیلـوگرم بـر کیلـوگرم بـرای مصرف 80 کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آمد. سایر بررسی‌هـا نشان داده است که کاربرد مقدار بیشتر کود نیتروژن از طریق کاهش شاخص بازیافت نیتروژن به‌دلیل افزایش تلفـات نیتـروژن از طریـق دنیتریفیکاسیون، تبخیر آمونیومی، رواناب و آبشویی موجب کـاهش کارایی مصرف این عنصر گردد (Eickhout *et al.*, 2006).

کارایی مصرف آب: نتایج نشـان داد کـه بیشـترین کـارایی مصرف آب پیش‌بینی شده و مشاهده شده کینوا به‌ترتیب با 1/29 و 1/23 کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب بـرای مصـرف 200 کیلـوگرم نیتروژن+ 2500 مترمکعب بر هکتار آب بـه‌دسـت آمـد و کمتـرین کارایی مصرف آب پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیب با 0/28 و 0/37 کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب برای مصرف 7500 مترمکعـب آبیاری+ عدم مصرف نیتروژن حاصل شد (جدول 5). نتایج سـطح- پاسخ اثر آبیاری و نیتروژن بر کارایی مصرف آب نشـان داد کـه بـا افزایش آبیاری، کارایی مصرف آب کاهش و با افزایش میزان مصرف کود نیتروژن این صفت افزایش یافت (شکل 2). گیـاه کینـوا جهـت مقابله با خشکی و افزایش راندمان مصرف آب روزنـه‌هـای بـرگ را بسته که خود موجب حفظ پتانسیل آب برگ و سـرعت فتوسـنتز در طول خشک شدن خاک می‌گردد، از طرفی در طـول خشـک شـدن خاک، ریشه‌های گیاه آبسیزیک اسید تولید کرده کـه باعـث تنظـیم فعالیت روزنه‌ها از طریق کاهش آماس سلول‌های نگهبـان روزنـه و هدایت روزنه‌ای می‌شود (Jacobsen *et al.*, 2009). نتـایج مطالعـه استیکیچ و همکاران (Stikic *et al.*, 2015) روی بررسی اثر خشکی بر رژیم‌های آبی و رشد گیاه کینوا نشان داد واکنش ایـن گیـاه بـه خشکی به‌صـورت مکانیسـم اجتنـاب از خشـکی، براسـاس کـاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش سطح برگ، کاهش تعرق و افزایش جـذب آب است. بنابراین این محققان گیاه کینوا را به‌عنوان یک محصـول جدید مقاوم در برابر خشکسالی معرفی نمودند که توسعه کشت و کار آن به‌ویژه در مناطق خشک و کـم‌آب مـی‌توانـد ثبـات تولیـد را در مناطق مختلف آب و هوایی دنیا به‌ویژه این مناطق تضـمین نمایـد. بهره‌وری آب کشـاورزی در کشـور حـدود 0/88 کیلـوگرم بـه ازای مصرف یک مترمکعب مصرف آب گزارش شده است که برای گندم، شلتوک، پنبه، ذرت، چغندرقند و نیشکر به‌ترتیب برابـر 0/77، 0/36، 0/16، 0/51، 0/34 و 0/31 کیلوگرم به ازای مترمکعب آب محاسبه شـده اسـت (Keshavarz and Dehghani, 2012). در پژوهشـی گلخانه‌ای روی بررسی اثر تنش آبی بر عملکرد کینوا گزارش شد که بیشترین بهره‌وری مصرف آب (2/14 کیلوگرم در مترمکعب) در تیمار تنش در کل دوره رشد مشاهده شد (Jamali *et al.*, 2019). یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2016) در پژوهشی روی مطالعـه تحمـل گیاه کینوا نسبت به افزایش خشکی و درجه حرارت تحت سه تیمـار آبیاری (آبیاری کامل، کمبود آبیاری و خشـکی متنـاوب در منطقـه ریشه) و دو رژیم حرارت (18/8 و 25/20 درجه سانتی‌گـراد) نشـان دادند که ارتفاع بوته و وزن خشک ساقه تحت تاثیر تیمـار خشـکی متناوب در منطقه ریشه و کمبود آبیـاری بـه‌طـور قابـل‌تـوجهی در مقایسه با تیمار آبیاری کامل کاهش یافت. همچنین گیاهان در تیمار خشکی متناوب در منطقه ریشه، ارتفاع بوتـه بلنـدتر و وزن خشـک بالاتری در مقایسه با کمبود آبیاری بـه‌خصـوص در درجـه حـرارت بالاتر داشتند. رشد گیاه در تیمار خشکی متناوب در منطقه ریشه بـا افزایش بهره‌وری آب، همراه بود. براین اساس، این محققان این گیاه را به دلیل نیاز آبی پایین، مقاومت به درجه حرارت‌های بالا و کارایی مصرف آب بالاتر بدلیل تحمل شرایط خشکی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی نمودند.

بهینه‌سازی: مقادیر بهینه کـاربرد نیتـروژن و آب در زراعـت کینوا برای حصول پاسخ عملکرد دانه، بازیافـت نیتـروژن و کـارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصـرف آب تحـت تـأثیر سـه سـناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطـی در جـدول 6 ارائه شده است.

مقدار شاخص مطلوبیـت[1] بهینـه‌سـازی (0<DI≤1) بـرای سـه سناریوی اقتصادی، زیسـت‌محیطـی و اقتصـادی- زیسـت‌محیطـی به‌ترتیب برابر 0/82، 0/74 و 0/93 به‌دست آمد که نشـان‌دهنـده‌ی نتایج قابل قبولی برای سطوح پاسخ تحت تأثیر متغیرهای مستقل در هر سه سناریو می‌باشد. لازم به ذکر است هرچه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهـای وابسـته تحـت تـأثیر متغیرهـای مسـتقل مـی‌باشـد (Kalavathy *et al.*, 2009). در سناریوی اقتصادی عملکـرد دانـه به‌عنوان فاکتور اصلی تعیین‌کننده مقادیر بهینه منابع درنظر گرفتـه شد. بدین ترتیب نتایج نشان داد که با کاربرد حـدود 170 کیلـوگرم نیتروژن در هکتار و مقدار 7500 مترمکعب آبیاری در طول فصل رشد می‌توان به عملکرد دانه بالغ بر 3530 کیلوگرم در هکتـار و کـارایی مصرف نیتروژن 11/78 کیلوگرم دانه بر کیلـوگرم نیتـروژن خـاک، بازیافت نیتروژن 34 درصد و کارایی مصرف آب 0/43 مترمکعب در هکتار دست پیدا کرد (جدول 6). در سناریوی زیست‌محیطی کارایی مصرف نیتروژن، بازیافت نیتروژن و کارایی مصـرف آب بـه‌عنـوان فاکتورهای بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفتند. در واقع، در این سـناریو کاهش هدر رفت آب، استفاده کمتر از کودهای شیمیایی که منجر به بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌گـردد، مـد نظـر بـوده و توجـه کمتری به عملکرد اقتصادی شده اسـت و در نهایـت، در سـناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی به تمام عوامل توجه شده است که نتـایج

1- Desirability index

نشان می‌دهد که این سناریو بر سایر سناریوها ارجحیت دارد و هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که کارایی مصرف نیتروژن با 15/93 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک، بازیافت نیتروژن 50 درصد و کارایی مصرف آب 0/5 کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب محاسبه شد که با کاربرد حدود 6000 متر مکعب در هکتار آبیاری و 90 کیلوگرم نیتروژن در هکتار میسر خواهد بود (جدول 6).

جدول 6- مقدار بهینه میزان نیتروژن و آب کینوا برای متغیرهای وابسته در سناریوهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی
Table 6- Optimizing of nitrogen and water levels of quinoa for dependent variables in economic, environmental and Economic-environmental scenarios

متغیر Variable		سناریوها Scenarios		
		اقتصادی Economic	زیست‌محیطی Environmental	اقتصادی- زیست‌محیطی Economic-environmental
وابسته Dependent	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha^{-1})	3522.84	2460.41	3120.76
	کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg seed/ m^3 water)	0.43	0.72	0.5
	بازیافت نیتروژن Nitrogen recovery (percent)	34	65.03	50.04
	کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency (kg N seed/kg N soil)	11.78	19.24	15.93
مستقل Independent	میزان آب Water rate (m^3.ha^{-1})	7500	3409.09	5909.48
	میزان نیتروژن Nitrogen rate (kg.ha^{-1})	169.7	18.18	88.57
شاخص مطلوبیت Desirability index		0.82	0.74	0.93

در این سناریو علاوه بر این‌که عملکرد اقتصادی تفاوت زیادی با سناریوی اقتصادی ندارد (عملکرد دانه در سناریوی اقتصادی 12 درصد بیشتر از عملکرد سناریوی زیست‌محیطی- اقتصادی محاسبه شده است) آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌واسطه استفاده کم‌تر از نهاده‌ها کاهش قابل‌توجهی داشته است. بر این اساس، با توجه به کمبود منابع آبی در راستای نیاز به افزایش تولید غذا به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بخش نسبتاً زیادی از مساحت کره زمین را به خود اختصاص داده است، توصیه می‌شود کاشت گیاهان جدید مقاوم به کم‌آبی همچون کینوا بر اساس سناریوهای اقتصادی- زیست‌محیطی که توجه هم‌زمانی نسبت به مصرف منابع محیطی به‌ویژه آب و نیتروژن در راستای تولید عملکرد قابل قبول دارد، مدنظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد دانه کینوا با افزایش میزان نیتروژن و آبیاری، افزایش می‌یابد و این گیاه به کودپذیری واکنش مثبت نشان می‌دهد، به‌طوری‌که بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 3835/4 و 3860/6 کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب برای مصرف 200کیلوگرم نیتروژن در هکتار+ 7500 مترمکعب آبیاری و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار+ 5000 مترمکعب آبیاری به‌دست آمد. بیشترین کارایی مصرف نیتروژن و بازیافت نیتروژن در شرایط عدم مصرف نیتروژن به‌دست آمد و این شاخص‌ها با افزایش میزان نیتروژن، کاهش یافتند که این امر یکی از دلایل مربوط به افزایش فراهمی نیتروژن تحت تاثیر تلفات نیتروژن از طریق آبشویی بوده و در نهایت، کاهش کارایی جذب و مصرف نیتروژن و تشدید بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی را موجب می‌گردد. بیشترین کارایی مصرف آب پیش‌بینی شده و مشاهده شده کینوا به‌ترتیب با 1/29 و 1/23 کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن+ 2500 مترمکعب بر هکتار آب به‌دست آمد. توجه به اصول اولیه بهبود کارایی مصرف منابع و جلوگیری از هدر رفت نهاده‌های کشاورزی در راستای حفظ سطح مطلوب تولید، دستیابی به تولید پایدار محصولات زراعی است. در این مطالعه، سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی بررسی شد که در مقایسه هر سه سناریوی ذکر شده، سناریوی اقتصادی-

زیست‌محیطی به‌علت توجه هم‌زمان به جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ارجحیت دارد و با کاربرد کمتر میزان نیتروژن و آب، عملکرد دانه قابل قبولی در گیاه تولید شد و آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

سپاسگزاری

بودجه این پژوهش از محل اعتبار طرح پژوهه شماره 47607 مورخ 1397/07/04 توسط معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Arbab Soleimani, A., and Ezzati, A. 2015. Nutritional value and functional properties of quinoa. Third National Conference on Agriculture and Sustainable Natural Resources. Tehran. (in Persian).
2. Aslan, N. 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-ravity Separator for coal cleaning. Fuel 86: 769-776.
3. Basra, S. M. A., Iqbal, S., and Afzal, I. 2014. Evaluating the response of nitrogen application on growth, development, and yield of quinoa genotypes. International Journal of Agriculture and Biology 16 (5): 886-892.
4. Berti, M., Wilckens, R., Hevia, F., Serri, H., Vidal, I., and Mendes, C. 2000. Fertilization nitrogen ada en quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Ciencia Investigsction Agraria 27: 81-90. (in Spanish with English abstract).
5. Box, G. E. P., and Hunter, J. S. 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. The Institute of Mathematical Statistics. p. 195-241.
6. Box, G. E. P., and Wilson, K. B. 1951. On the experiment attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 13: 1-45.
7. Clarke, G. M., and Kempson, R. E. 1997. Introduction to the Design and Analysis of Experiments. Arnold, London. 334 p.
8. Dean, A., and Voss, D. 2002. Design and Analysis of Experiments. Springer Texts in Statistics. New York.
9. Eickhout, B., Bouwman, A. F., and van Zeijts, H. 2006. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. Agriculture, Ecosystems and Environment 116: 4-14.
10. Erley, G. S. A., Kaul, H., Kruse, M., and Aufhammer, W. 2005. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. European Journal of Agronomy 22 (1): 95-100.
11. Geren, H. 2015. Effects of different nitrogen level on the grain yield and some yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under Mediterranean climatic conditions. Turkish Journal of Field Crops 20: 59-64.
12. Goma, E. F. 2013. Effect of nitrogen, phosphorus, and biofertilizers on quinoa plant. Journal of Applied Sciences Research 9 (8): 5210-5222.
13. Hatermink, A. E., Johnston, M. O., Sullivan, J. N., and Poloma, S. 2000. Nitrogen use efficiency of taro and sweet potato in the humid lowlands of Papua New Guinea. Agriculture, Ecosystems and Environment 79: 271-280.
14. Heidari, N., Pouryousef, M., and Tavakoli, A. 2014. Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.). Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology) 27 (5): 829-839. (in Persian with English abstract).
15. Hosseinzad, J., Kazemieh, F., Javadi, A., and Ghafouri, H. 2013. Agricultural water management basis and mechanisms in Tabriz plain. Water and Soil Science 23 (2): 85-98. (in Persian with English abstract).
16. Jacobsen S. E., Liu, F., and Jensen, C. R. 2009. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Scientia Horticulture 122 (2): 281-287.
17. Jacobsen, S. E. 1998. Developmental stability of quinoa under European conditions. Industrial crops and products 7: 169-174.
18. Jamali, S. 2016. Investigation the effect of different salinity and deficit-irrigation levels on yield and yield components of quinoa. M.Sc. Thesis, College of agriculture, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. Gorgan. Iran. (in Persian with English abstract).
19. Jamali, S., Goldani, M., and Zeynodin, S. M. 2019. Evaluation the effects of periodic water stress on yield, yield components and water productivity on quinoa. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 6 (13): 1687-1697. (in Persian with English abstract).
20. Jayme-Oliveira A., Ribeiro Júnior, W. Q., Ramos, M. L. G., Ziviani, A. C., and Jakelaitis, A. 2017. Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira 52 (8): 561-571.
21. Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G., and Miranda, L. R. 2009. Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H_3PO_4 activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). Colloids and Surfaces B: Bionterfaces 70: 35-45.
22. Kazemi, M., Alizadeh, A., and Sharifan, H. 2019. Assessing different irrigation levels on Yield and Yield

components of quinoa genotypes. Fourth National Research Conference on Development and Extension in Agriculture, Natural Resources, and Environment. Jiroft, Iran. (in Persian).

23. Keshavarz, A., and Dehghani Sanij, H. 2012. Water Productivity Index and Solutions for Future Agricultural Activities in Iran. Economic Strategy 1: 199-233. (in Persian with English abstract).
24. Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., and Taghavi Zahedkolaei, M. 2019. Study of kinetic and Isotherm for ammonium and nitrate adsorption by common reed (*Phragmites australis*) biochar from aqueous solution, Iranian Journal of Soil and Water Research 50 (8): 2009-2021. (in Persian with English abstract).
25. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Amiri, M. B., and Fallah Poor, F. 2019. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. Journal of Agroecology 11 (2): 515-530. (in Persian with English abstract).
26. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Khorramdel, S., and Morid Ahmadi, S. 2018 Optimization of plant density and nitrogen use in corn (*Zea mays* L.) by Central Composite Design. Iranian Journal of Field Crops Research 15 (4): 798-810. (in Persian with English abstract).
27. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Mansouri, H. 2013. Optimization of water, nitrogen, and density in canola cultivation by central composite design. Journal of Agroecology 3 (1): 1-16. (in Persian with English abstract).
28. Kwak, J. S. 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45: 327-341.
29. Latifi, H., Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., and Farzaneh Belgerdi, M. R. 2018. Effects of nitrogen fertilizer and plant density on yield and nitrogen efficiency indices of sesame using a central composite design. Journal of Plant Production Research 25 (3): 125-140. (in Persian).
30. Lilian, E. A. J. 2009. Chapter 1: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Chemistry, Nutritional, and Functional Properties. Advances in Food and Nutrition Research 58: 1-3.
31. Manivannan, P., Abdul Jaleel, C., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G. M. A., and Panneerselvam, R. 2007. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in (*Helianthus annusus* L.) as induced by drought stress. Colloids and Surfaces 59: 141-149
32. Matiasevich, S. B., Castellion, M. L., Maldonado, S. B., and Buera, M. P. 2006. Water-dependent thermal transition in quinoa embroys. Thermochimica Acta 448: 117-122.
33. Montemuro, F., Maiorana, M., Ferri, D., and Convertini, G. 2006. Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and source of N fertilization. Field Crop Research 99: 114-421.
34. Montgomery, D. C. 2001. Design and Analysis of Experiments. Fifth ed., John Wiley and Sons, New York.
35. Myers, R. H., and Montgomery, D. C. 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 2nd Edition Wiley, New York.
36. Obeng, D. P., Morrell, S., and Napier, T. J. N. 2005. Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone. International Journal of Mineral Processing 769: 181-192.
37. Razzaghi, F., Bahadori-Ghasroldashti, M. R., Henriksen, S., Sepaskhah, A. R., and Jacobsen, S. E. 2020. Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to deficit irrigation imposed at different growing stages-A field study from Southern Iran. Journal of Agronomy and Crop Science 206 (3): 390-404.
38. Rodrigues, G. C., and Pereira, L. S. 2009. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. Biosystems Engineering 103: 536-551.
39. Sepahvand, N. A., Tavazoa, M., and Kohbazi, M. 2010. Quinoa valuable plant for alimentary security and adaptation agricultural in Iran. 11th National Iranian Congress on Crop Science. 24-26 Jul. Tehran. (in Persian with English abstract).
40. Shams, A. S. 2012. Response of quinoa to nitrogen fertilizer rates under sandy soil conditions. In Proc. 13th International Conf. Agron., Fac. of Agric., Benha Univ., Egypt (pp. 9-10).
41. Shao, H. C., Yan, C. Y., Ning, Z., Gang, W., Yong-Bing, Y., Chang-Xing, Z., and Zan-Min, H. 2006. Investigation on the relationship of proline with wheat (*Triticum* spp.) anti-drought under soil water deficits. Colloids and Surfaces 53: 113-119
42. Stikic, R., Jovanovic, Z., Majanovic, M., and Dordevic, S. 2015. The effect of drought on water regime and growth of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Ratar. Povrt. 52 (2): 80-84.
43. Telahigue, D., Ben Yahia, L., Aljane, F., Belhouchett, K., and Toumi, L. 2017. Grain yield, biomass productivity and water use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. Journal of Scientific Agriculture 1: 222-232.
44. Yang, A., Akhtar, S. S., Amjad. M., Iqbal, S., and Jacobsen, S. E. 2016. Growth and physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and temperature stress. Journal of Agronomy and Crop Science 202 (6): 445-453.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 2, Summer. 2021, p. 185-199

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد 19، شماره 2، تابستان 1400، ص. 199-185

Optimization of Irrigation and Nitrogen Levels on Yield, Water Use Efficiency, and Nitrogen Use Efficiency of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) by Using the Surface-Response Methodology

P. Rezvani Moghaddam[1*], S. Khorramdel[2], H. Latifi[3], M. R. Farzaneh Belgerdi[4], S. J. Davarpanah[5]

Received: 19-01-2021
Accepted: 12-05-2021

Introduction

The optimum resource level in agro-ecosystems should be determined to decrease production costs, conserve resources, and mitigate environmental pollutions. Optimization is an effective and sustainable management approach to conserve resources and decline environmental pollutions. Response surface methodology (RSM) is defined as a collection of mathematical and statistical techniques used to develop, improve, or optimize a product. RSM is a statistical technique for optimization of multiple factors that determine optimum rates by combining experimental designs. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a pseudocereal, seed-producing annual crop, and a staple food in South America in ancient times, indigenous to the Andean region of South America, particularly Bolivia, Peru, Ecuador, and parts of Chile, which has the potential to grow with low inputs, mostly water and tolerate a variety of biotic and abiotic stresses. Quinoa seed is gluten-free foods, good sources of carbohydrates, good-quality proteins, lipids, vitamins, minerals, and bioactive compounds, with all the essentials, trace elements, and many vitamins. In this work, optimization of nitrogen and water rates on quinoa was done.

Materials and Methods

An experiment was conducted using *Central Composite Design* (CCD) with 13 treatments and two replications at the Research Field of the Ferdowsi University of Mashhad during the growing season of 2017-2018. The treatments were allocated based on low and high water (2500 and 7500 m^3 ha^{-1}, respectively) and nitrogen (0 and 200 kg ha^{-1}, respectively) levels. Seed yield, biological yield, N recovery, N use efficiency (NUE), and water use efficiency (WUE) were calculated as dependent variables, and changes of these variables were evaluated by a regression model. A lack-of-fit test was used to evaluate the quality of the fitted model. The adequacy of the model was tested by analysis of variance. The quality of the fitted models was judged using the determination coefficient (R^2). Finally, the optimum nitrogen and water rates were computed based on economic, environmental, and economic-environmental scenarios.

Results and Discussion

The results showed that the effect of linear and square components was significant on all studied characteristics. The interaction effect of full quadratic was significant on NUE and WUE. Lack of fit test had no significant effect on the studied traits. The full square model for the response variables gave insignificant lack-of-fit, indicating that the data were satisfactorily explained. Surface-response results of the effect of irrigation and nitrogen levels on grain yield and biological yield showed that with increasing nitrogen consumption and irrigation, quinoa yield indices increased, but in terms of nitrogen use, with increasing nitrogen consumption more than 100 kg ha^{-1}, the grain yield increased with more slope. The highest value of seed yield was observed for 7500 m^3 ha^{-1} irrigation and 200 kg nitrogen ha^{-1} with 3835.4 kg ha^{-1}. Optimum nitrogen and water rates were suggested to determine the target range of dependent variables based on three scenarios: economic, environmental, and eco-environmental. It is necessary to use 169.7 kg nitrogen ha^{-1} and 7500 m^3 ha^{-1} irrigation to obtain optimum conditions under the economic scenario. The optimum nitrogen and irrigation rates based on environmental scenarios were computed from 18.18 kg nitrogen ha^{-1} and 3409 m^3 ha^{-1} irrigation water. Application of 88.57 kg nitrogen ha^{-1} and 5909 m^3 ha^{-1} irrigation water was found to be the optimum conditions for the eco-environmental scenario (NUE, N recovery, seed yield, and WUE were calculated with 15.93 kg seed kg^{-1} N, 50.04%, 3120.76 kg ha^{-1}, and 0.5 kg seed m^{-3} water, respectively).

1- Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3- PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4- MSc in Agrometeorology, Deputy of Insurance Services, Bank Keshavarzi, Khorasan Razavi Province
5- PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: rezvani@um.ac.ir)

Conclusions

Increasing nitrogen led to increased seed yield and decreased nitrogen use efficiency, whereas increasing irrigation caused an increase in seed yield and nitrogen use efficiency. In general, it seems that resource use based on the eco-environmental scenario may be a suitable cropping approach for the sustainable production of quinoa as a new crop.

Keywords: *Central Composite Design*, *Economic*- environmental scenario, Lack of fit, New crop, Sustainable production